

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 19920101152729

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

隧道无线电波的传播衰减特性及覆盖方案的研究

Cover Design and Research on Radio Waves Propagation

Attenuation Characteristic in Tunnels

雷 毅

指导教师姓名 : 冯 勇 建 教授

专 业 名 称 : 机 械 工 程

论文提交日期 : 2013 年 5 月

论文答辩时间 : 2013 年 月

学位授予日期 : 2013 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013 年 5 月

隧道无线电波的传播衰减特性及覆盖方案的研究

雷毅

指导教师

冯勇建教授

厦门大学

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘要

本文以厦门厦工机械股份有限公司“滑移装载机远程无线监视与控制系统”项目为研究背景，采用理论分析、计算机仿真和实地测试实验的方法，着力研究了当无人装载机在隧道内工作时无线电波的传播衰减特性，提出了隧道内无线电波传播衰减模型以及在不同隧道中 WLAN 的覆盖方案和优化的设计，并且进行了隧道 WLAN 覆盖区的实地调试，保证了隧道内 WLAN 的覆盖。就此，本文主要开展了以下研究工作：

1、本文将电磁波理论公式结合隧道内无线电波的传播方式特点，采用波模匹配分析法从理论上分析了电波频率、隧道壁的相对介电常数、截面尺寸以及弯曲半径对电波传输的影响，并根据隧道内电波的传播特点，提出了无线电波在隧道内的传播损耗模型。根据建立的传播损耗模型，预算了三种天线条件下隧道覆盖距离，设计了覆盖方案并提出了网络优化解决办法。

2、提出了用 Ansoft HFSS 三维软件对隧道波导进行建模仿真的方法，仿真得出了隧道波导中电波的传播常数，直观图示了隧道波导无线电波的空间场分布，验证了理论方法的可行性和正确性。

3、通过对隧道内三种天线方案的电波信号强度、传播速率、时延及丢包率的测试，得出了信号质量与传播距离的变化规律，拟合了传播衰减曲线，验证了隧道内电波传播衰减模型的可行性和准确性。

4、对预算得到的隧道 WLAN 覆盖区进行了现场调试和对比试验，实验结果表明覆盖区内信号稳定、可靠。在研究的基础上，搭建了无人装载机远程控制系统并取得了良好的研究成果，这为隧道工程机械信息化、自动化作业的实现提供了一个很好的平台。

**关键词：**隧道；无线电波；传播特性；覆盖；

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

In this thesis, the development project of Xiamen Engineering Machinery Co., Ltd., called "slide loader remote wireless monitoring and control system" was taken as the research background. By the method of the theoretical analysis, computer simulation and field test, it focused on the research about waves propagation attenuation characteristics when there was a pilotless loader working in tunnel. The attenuation model of radio waves propagation in tunnel was put forward. The WLAN coverage scheme and optimized design in different tunnels were provided. The debugging on the spot of WLAN coverage area were carried on to ensure the coverage of the WLAN in tunnels. In this, the mainly research work of this thesis were as follows:

- 1, Combining the way of radio waves propagation in tunnels with electromagnetic theory formula, the frequency of radio wave, the relative dielectric constant of tunnel wall, the section size and bending radius of tunnel influence on electric wave transmission were analyzed theoretically by the method of mode matching in tunnel. According to the waves propagation characteristics in tunnel, the radio waves propagation attenuation model was proposed. According to the propagation loss model, we budgeted out the covered distance under the condition of three kinds of antennas in tunnels. Also the design scheme and solution of network optimization was put forward.

- 2, The method of 3d software modeling and simulation of tunnel waveguide by Ansoft HFSS was put forward. The wave propagation constant in tunnel waveguide was obtained by computer simulation, and it intuitively and graphically showed out of the space distribution of radio waves in tunnel waveguide. It validated the correctness and feasibility of the theory method.

- 3, We had tested signal strength, transmission rate, delay and packet loss rate by three different types of antenna scheme in the different tunnels, and obtained the changing rule of the signal quality with the propagation distance. Finally we fitted out the



waves propagation attenuation curve, which could validate the feasibility and accuracy of wave propagation attenuation model in tunnels.

4, The field debug and experiment were carried on in the budgeted WLAN coverage areas, the results showed that the signal in covers areas is stable and reliable. On the basis of the research, we set the remote control system of pilotless loaders and achieved good results, which would provid a good platform for the automation and informatization of construction machinery in tunnels in the future.

**Key words:** Tunnels; Radio waves; Propagation Attenuation Characteristics; Coverage;

# 目 录

<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 课题的研究目的及意义 .....	1
1.2 隧道内无线通讯的研究现状 .....	2
1.3 本文的研究内容 .....	4
<b>第二章 隧道内电磁波的传播 .....</b>	<b>6</b>
2.1 引言 .....	6
2.2 隧道内电磁波的传播方式 .....	7
2.2.1 直射波.....	8
2.2.2 反射波.....	8
2.2.3 散射波.....	8
2.3 电磁波的理论基础 .....	8
2.3.1 麦克斯韦方程.....	9
2.3.2 边界条件.....	10
2.4 波模匹配分析法 .....	11
2.4.1 基本理论.....	12
2.4.2 波模匹配分析法的验证.....	14
2.5 隧道内电波的传播特性 .....	15
2.5.1 隧道内电波的频率对传播衰减的影响.....	16
2.5.2 隧道壁的相对介电常数对电波传播衰减的影响.....	18
2.5.3 隧道截面尺寸对电波传播衰减的影响.....	19
2.5.4 隧道弯曲度对电波传播衰减的影响.....	20
2.6 隧道内电波传播损耗模型的建立 .....	22
2.6.1 无线电波在自由空间中的路径损耗.....	22
2.6.2 隧道内电波的多径传播损耗.....	23
2.6.3 隧道内电波传播损耗模型的建立.....	25
2.7 本章小结 .....	27
<b>第三章 基于 Ansoft HFSS 软件的隧道内电波传播仿真 .....</b>	<b>28</b>
3.1 引言 .....	28

3.2 仿真软件介绍 .....	28
3.2.1 引言 .....	28
3.2.2 仿真软件的理论基础 .....	29
3.2.3 仿真软件的操作方法简介 .....	29
3.3 隧道内无线电波传播模型仿真 .....	30
3.3.1 仿真模型的建立 .....	31
3.3.2 边界、材质、激励设置 .....	31
3.3.3 设置分析及仿真结果 .....	32
3.4 仿真结果的分析 and 对比 .....	34
3.5 本章小结 .....	36
<b>第四章 隧道内电波传播测试及结果分析 .....</b>	<b>37</b>
4.1 引言 .....	37
4.2 测试实验设备选型 .....	38
4.2.1 信号源 .....	38
4.2.2 发射天线 .....	39
4.2.3 馈线 .....	41
4.2.4 信号接收终端 .....	41
4.3 测试实验方法及结果 .....	42
4.3.1 测试实验设计 .....	42
4.3.2 测试结果 .....	43
4.4 测试实验结果分析 .....	51
4.4.1 隧道截面面积对电波接收功率的影响 .....	53
4.4.2 隧道弯曲度对电波接收功率的影响 .....	54
4.4.3 隧道内天线高度对电波接收功率的影响 .....	54
4.4.4 三种测试方案的对比 .....	55
4.5 本章小结 .....	57
<b>第五章 隧道内 WLAN 的覆盖方案设计及应用 .....</b>	<b>59</b>
5.1 引言 .....	59
5.2 隧道内 WLAN 覆盖范围设计 .....	59
5.2.1 隧道内 WLAN 的路径损耗计算 .....	59
5.2.2 隧道内 WLAN 传播模型参数计算 .....	60

5.3 不同隧道中 WLAN 覆盖方案的选择.....	61
5.3.1 短隧道及中等长度隧道覆盖方案.....	61
5.3.2 长隧道覆盖方案.....	63
5.4 隧道内覆盖区网络的优化 .....	65
5.4.1 不同信区漫游问题.....	66
5.4.2 信道干扰问题.....	66
5.4.3 网络安全问题.....	67
5.5 隧道内 WLAN 覆盖区的网络调试.....	68
5.6 隧道内基于 WLAN 的无人装载机控制系统的应用.....	70
5.6.1 无人装载机控制系统的工作机理.....	70
5.6.2 无人装载机控制系统的结构.....	72
5.6.3 结果.....	74
5.7 本章小结 .....	74
第六章 总结与展望 .....	76
6.1 工作总结 .....	76
6.2 展望 .....	78
参 考 文 献 .....	80
硕士期间发表的论文及专利 .....	84
致 谢.....	85

# Contents

<b>Chapter 1 Preface .....</b>	<b>1</b>
1.1 The purpose and significance of this research .....	1
1.2 The research status of wireless communications in the tunnels .....	2
1.3 the research content of this paper .....	4
<b>Chapter 2 Electromagnetic wave propagation in tunnels .....</b>	<b>6</b>
2.1 Introduction.....	6
2.2 Radio waves propagation in tunnels .....	7
2.2.1 Direct wave .....	8
2.2.2 Reflected wave.....	8
2.2.3 Scattered wave .....	8
2.3 Theoretical foundation of the radio waves .....	8
2.3.1 Maxwell equation.....	9
2.3.2 Boundary conditions .....	10
2.4 The waves mode matching method .....	11
2.4.1 Basic theory .....	12
2.4.2 Validity verification of waves mode matching method .....	14
2.5 The radio waves propagation characteristics in tunnel.....	15
2.5.1 Frequency of the waves on the influence of propagation attenuation in tunnels.....	16
2.5.2 Relative dielectric constant of tunnel wall on the influence of waves propagation attenuation in tunnels.....	18
2.5.3 Cross section size of tunnel on the influence of waves propagation attenuation in tunnels .....	19
2.5.4 Tunnel curvature on the influence of waves propagation attenuation in tunnels.....	20
2.6 The establishment of radio waves propagation loss model in tunnels .....	22
2.6.1 Path loss of radio waves in free space .....	22
2.6.2 Multipath propagation loss of radio waves in tunnel.....	23
2.6.3 The establishment of waves propagation loss model in tunnels.....	25

2.7 Chapter summary .....	27
<b>Chapter 3 Based on Ansoft HFSS software the radio waves</b>	
<b>propagation simulation in tunnels.....</b>	<b>28</b>
3.1 Introduction.....	28
3.2 The introduction of simulation software.....	28
3.2.1 Introduce .....	28
3.2.2 The theoretical basis of the simulation software.....	29
3.2.3 The operation method of simulation software .....	29
3.3 The simulation of radio waves propagation model in tunnels .....	30
3.3.1 The establishment of simulation model .....	31
3.3.2 Boundary, material quality, incentive settings .....	31
3.3.3 Analysis and simulation results .....	32
3.4 The simulation results of analysis and comparison .....	34
3.5 Chapter summary .....	36
<b>Chapter 4 The test and result analysis about radio waves</b>	
<b>propagation in tunnels.....</b>	<b>37</b>
4.1 Introduction.....	37
4.2 Test equipment selection.....	38
4.2.1 Signal source.....	38
4.2.2 Transmitting antenna.....	39
4.2.3 Feeder and power dividers .....	41
4.2.4 Reception terminal .....	41
4.3 Test methods and results .....	42
4.3.1 Test method design .....	42
4.3.2 Test results .....	43
4.4 Test results analysis.....	51
4.4.1 Cross section size of tunnels on the influence of waves received power.....	53
4.4.2 Bending of tunnels on the influence of waves received power .....	54
4.4.3 Antenna height in on the influence of waves received power .....	54

4.4.4 Comparison of three test schemes.....	55
<b>4.5 Chapter summary .....</b>	<b>57</b>
<b>Chapter 5 Coverage scheme design and application of WLAN in tunnels .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1 Introduction.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2 WLAN coverage design in tunnels .....</b>	<b>59</b>
5.2.1 Path loss calculation of WLAN in tunnels.....	59
5.2.2 Propagation model parameters calculation of WLAN in tunnels .....	60
<b>5.3 Coverage design ways of WLAN in different tunnels .....</b>	<b>61</b>
5.3.1 Coverage design in medium length or short tunnels.....	61
5.3.2 Coverage design in long tunnel.....	63
<b>5.4 Network optimization in coverage area of tunnels .....</b>	<b>65</b>
5.4.1 Different signal area roaming problems .....	66
5.4.2 Channel interference problems .....	66
5.4.3 Network security problems .....	67
<b>5.5 WLAN network debugging in the covered area of tunnel .....</b>	<b>68</b>
<b>5.6 Based on WLAN application the control system of unmanned loaders.....</b>	<b>70</b>
5.6.1 Working mechanism of unmanned loaders control system .....	70
5.6.2 Structure of unmanned loaders control system .....	72
5.6.3 Results.....	74
<b>5.7 Chapter summary .....</b>	<b>74</b>
<b>Chapter 6 Conclusion and prospect.....</b>	<b>76</b>
6.1 Conclusion .....	76
6.2 Prospect.....	78
<b>References .....</b>	<b>80</b>
<b>Publications .....</b>	<b>84</b>
<b>Thanks.....</b>	<b>85</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的研究目的及意义

随着现代科技水平的不断提高,无线通信技术是当前发展最快、应用最广、最前沿的通信领域之一。据凤凰网的有关报道称,到2003年3月止我国手机用户已突破10亿大关,并保持着快速增长的趋势,还不包括人们自主组建的其他无线微波网络,可见无线通信技术的地位是十分重要的。生活中无线通信与人已融于到一起,人们的生活已无法脱离无线通信工具,大家期盼着能够在地球上的任何位置都能够使用无线通信工具进行相互沟通交流。

然而对于某些特殊环境下的无线通信技术就是一个很大的挑战,例如隧道这种受限空间内无线通讯问题。如今在生产、调度、抢险、救灾等工作中人们把无线通信当作一种重要工具,因此,在隧道中通过借助无线通信来完成生产、调度、抢险救灾等工作也是许多研究人员所关注的热点。

众所周知,隧道内的无线通信不同于在地面上,因其受空间、环境、地形地貌等因素的影响较大,衰落特性很复杂,故其与有线通信相比,可靠性相差甚远。一般情况下,隧道是一个半封闭的特殊环境,隧道内部结构十分地复杂,一般途径溶洞、岩浆、煤层、水层等恶劣环境,隧道壁并不像地面那样平坦,通常情况下是凹凸不平且分布并不均匀。岩石成分复杂,可能为花岗岩、大理石等不同的岩体,这些岩体在介电常数、传导率以及对电磁波的吸收能力等方面差异很大。隧道最大的特征,就是通常情况下并不是直的,很多隧道都是弯曲的且有些弯曲的角度比较大,有的隧道内部还有很多分支,隧道的截面也并不规则,有的是拱形,圆形,半圆形或者矩形。尤其是在施工环境中,人来车往、机械掘进或打眼、放炮等工作情况极其复杂。根据现场情况,若采用无线通讯的方式来完成工作,这样就有了隧道内无线电波传输的距离、损耗等问题。因此,如何保证隧道内无线通讯的稳定和可靠,已成为无线通信领域的一个重要的研究方向。

由于隧道内部的空间是受限的,隧道内无线电波传输的机理与模式仍有许多问题值得深入探讨,特别是近年来无线通信逐步应用到隧道中,而由于各种客观原因,相关的研究成果却较少,目前已有的一些结论相互之间也不完全一致,反



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库